

На правах рукописи



ВОРОНКОВ Григорий Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ OFDM-СИГНАЛОВ**

**Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2017

Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»

- Научный руководитель: д-р техн. наук, доцент
Кузнецов Игорь Васильевич,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»
- Официальные оппоненты: д-р техн. наук, профессор
Тяжев Анатолий Иванович,
советник при ректорате, профессор кафедры
радиосвязи, радиовещания и телевидения
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
университет телекоммуникаций и информа-
тики»
- д-р. техн. наук, доцент
Воловач Владимир Иванович,
заведующий кафедрой «Информационный и
электронный сервис» ФГБОУ ВО «Поволж-
ский государственный университет сервиса»
- Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный ис-
следовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ»

Защита диссертации состоится 29 сентября 2017 г. в 10 часов на заседа-
нии диссертационного совета Д 212.288.07 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский гос-
ударственный авиационный технический университет» по адресу: 450008,
г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфим-
ский государственный авиационный технический университет» и на сайте
www.ugatu.su.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д-р техн. наук, доцент



И.Л. Виноградова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время повышение энергоэффективности систем связи является особенно важным для беспроводных систем. Одной из основных задач при разработке устройств беспроводной связи (автономных систем связи) является уменьшение их энергопотребления. Одновременно для повышения их спектральной эффективности всё большее распространение приобретает технология ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM). Эта технология применяется в беспроводных локальных сетях (WLAN) стандарта WiFi, в сетях сотовой подвижной радиосвязи 4 поколения (LTE и LTE-Advanced), в сетях вещательного цифрового телевидения стандарта DVB-T2. Международным союзом электросвязи (МСЭ) технология OFDM рассматривается как одна из перспективных для организации каналов «спутник – Земля» и «спутник – спутник». Исходя из вышеизложенного, важным представляется повышение энергоэффективности систем связи, использующих ортогональное частотное мультиплексирование.

Решить эту задачу можно различными способами: уменьшением требований к вычислительной мощности бортовых вычислителей, сжатием данных, уменьшением динамического диапазона передаваемых в канал связи сигналов. При этом очевидным требованием является сохранение качества связи при повышении энергоэффективности системы. Известно, что подобным требованиям может удовлетворить использование дифференциального преобразования. Суть метода заключается в снижении динамического диапазона сигнала за счёт его сравнения с экстраполированным сигналом. Схема восстановления сигналов также дополняется блоком экстраполяции для восстановления сигнала сложением принятого сигнала с сигналом, синтезированным экстраполятором. Следовательно, актуальным представляется исследование вопроса применимости дифференциального преобразования в системах с ортогональным частотным уплотнением.

Степень разработанности темы. В современных системах беспроводной связи используются различные методы повышения энергоэффективности. Часть из них предполагает управление мощностью передачи мобильной станции по каналу управления от базовой станции, например, в сетях сотовой подвижной радиосвязи. Указанный метод позволяет регулировать мощность передатчика мобильного устройства для уменьшения энергопотребления при сохранении качества обслуживания, однако он не позволяет снизить максимальную мощность передачи. На её уменьшение направлены новые перспективные технологии цифровой модуляции и формирования сигналов, такие как поворот сигнального созвездия и двойная квадратурная манипуляция (QPSK). Однако эти методы требуют глубокой переработки схемотехнических решений, применяемых в существующих системах связи.

При решении проблемы дифференциального преобразования сигналов OFDM в рамках диссертационного исследования использовались труды отечественных и зарубежных ученых. Большой вклад в развитие идей дифференциального преобразования и экстраполяции сигналов оказали работы отечественных

учёных: Тихонова В.И., Стратановича Р.Л., Сосулина Ю.Г., Кловского Д.Д., Котельникова В.А., Финка Л.М., Шахновича И.В., Гольденберга Л.М., Карташевского В.Г., Громакова Ю.С., Султанова А.Х. и др. Среди зарубежных учёных необходимо выделить в первую очередь труды Винера Н., Калмана Р.Э., Свами М.Н., Спенсера Р., Клейнрока Л., Мартина Дж., Галлагера Р., Чапина К.К.

Следовательно, решение задачи повышения эффективности энергодефицитных систем передачи, использующих технологию ортогонального частотного мультиплексирования, на основе метода дифференциального преобразования сигналов путём их экстраполяции является актуальным как в научном, так и в практическом отношении.

Объект исследования. Системы беспроводной связи, использующие технологию ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM).

Предмет исследования. Методы повышения энергетической эффективности беспроводных систем на базе технологии OFDM.

Целью работы является повышение энергетической эффективности передатчиков систем OFDM за счет использования дифференциального преобразования на базе оптимальной экстраполяции сигналов.

Задачи исследования:

1. Разработка структурных решений для построения дифференциального кодека OFDM-сигналов для автономных систем связи.
2. Разработка математических моделей и методов синтеза передаточной функции экстраполяторов для различных структурных решений дифференциальных OFDM-кодеков.
3. Разработка модификации метода вторичного уплотнения для систем с OFDM.
4. Разработка методики оценки параметров качества предложенных моделей и имитационной модели дифференциального OFDM-кодера для системы дистанционного зондирования Земли и оценка её эффективности.

Научная новизна работы:

1. Разработаны структурные решения для построения кодеков системы с ортогональным частотным мультиплексированием (OFDM), *основанные* на дифференциальном методе обработки сигналов, *отличающиеся* наличием оптимального координированного экстраполятора и *позволяющие* добиться снижения динамического диапазона полосового сигнала.
2. Разработана математическая модель экстраполятора сигнала OFDM, *основанная* на применении фильтра Винера, *отличающаяся* совместным рассмотрением спектральных характеристик квадратурных каналов, и *позволяющая* синтезировать передаточную функцию единого экстраполятора для квадратурных каналов.
3. Разработана модификация метода вторичного уплотнения для систем с OFDM, *отличающаяся* уплотнением модулированных сигналов, *основанная* на минимизации взаимного влияния основного и вторичного каналов и *позволяющая* рассчитывать спектральные характеристики сигнала вторичного канала частот-

ным методом и, на уровне системы связи, передавать параметры экстраполятора приёмному блоку вне зависимости от способа организации основного канала.

4. Разработана методика оценки параметров качества предложенных моделей, *отличающаяся* последовательностью определения параметров широкополосного сигнала, характеристик экстраполятора и *позволяющая* определить снижение динамического диапазона полосового сигнала.

Теоретическая и практическая ценность полученных результатов состоит в возможности использования предложенных методов для повышения энергоэффективности существующих систем беспроводной связи. Применение дифференциальной обработки сигналов OFDM позволяет снизить динамический диапазон полосового сигнала, что обеспечивает понижение мощности передающих устройств. Одновременно с этим, экстраполяция сигнала играет роль «памяти канала», повышая помехоустойчивость системы связи в целом, что позволяет сохранить качество связи при снижении отношения сигнал - помеха на приёме. Использование канала вторичного уплотнения для передачи параметров экстраполятора от передающего устройства к приёмному позволяет снизить задержки на управление мощностью и позволяет добиться максимальной близости сигналов, экстраполированных приёмником и передатчиком. Синтезированные передаточные функции экстраполятора позволяют адаптивно изменять мощность полосового сигнала в зависимости от изменения параметров канала.

Методология и методы исследования. Результаты работы получены с использованием математического аппарата теории вероятностей и математической статистики, системного анализа, теории электрической связи, методов оптимальной фильтрации Калмана – Бьюси и Винера – Хопфа. Применены методы математического моделирования с использованием программных пакетов Maple и MatLab.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурные решения (схемы) кодеков для систем OFDM, основанные на координированной экстраполяции сигналов синфазного и квадратурного каналов.

2. Математические модели кодеков для систем OFDM для дифференциального преобразования «по входу» и «по выходу» и методы синтеза соответствующих передаточных функций координированного экстраполятора, основанные на решении модифицированных уравнений Винера – Хопфа и Калмана.

3. Алгоритм синтеза спектральных характеристик канала вторичного уплотнения для систем OFDM.

4. Методика оценки эффективности применения дифференциального способа обработки сигналов в оптико-электронном комплексе микроспутника дистанционного зондирования Земли.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации основана на использовании известных теоретических положений; корректности используемых математических моделей и их адекватности реальным физическим процессам.

Апробация результатов. Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 международных и всероссийских научно-технических конференциях: XVI и XVII Международной

научно-технической конференции “Проблемы техники и технологии телекоммуникаций”, г. Уфа, 2015 г.; XVI и XVII Международной научно-технической конференции “Проблемы техники и технологии телекоммуникаций”, г. Самара, 2016 г.; Международной научно-технической конференции “Перспективные информационные технологии”, г. Самара, 2017 г.; Международной научно-технической конференции “Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2017”, г. Казань; III Международной конференции по фотонике и молодёжной школе «Информационные технологии и нанотехнологии», г. Самара, 2017 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК (из которых 1 статья в научном издании, входящем в базы цитирования RSCI на платформе Web of Science), 7 работ в сборниках трудов и материалах конференции.

Личный вклад. Постановка основных задач принадлежит научному руководителю. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно. Самостоятельно были разработаны: новые структурные решения (схемы) построения кодеков систем OFDM на основе дифференциальной обработки сигналов с использованием их экстраполяции, математические модели экстраполяторов на основе фильтра Калмана – Бьюси и Винера – Хопфа, алгоритм синтеза канала вторичного уплотнения для систем OFDM, структурное решение по использованию дифференциального метода в канале связи системы дистанционного зондирования Земли, методика оценки параметров качества предложенных моделей. Также автором диссертации были самостоятельно получены результаты имитационного моделирования.

Материалы диссертационной работы использовались в рамках базовой части государственного задания № 8.5701.2017/БЧ по теме «Разработка принципов синтеза радио- оптических информационно-телекоммуникационных систем с управлением по угловому моменту электромагнитного поля на основе спинорного представления уравнений Максвелла».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Содержит 126 с. машинописного текста, 47 рисунков, список использованной литературы из 73 наименований, приложения на 1 с.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована основная цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены системы передачи информации на базе технологии ортогонального частотного мультиплексирования, проведен анализ существующих структурных решений формирования сигнала OFDM, существующих методов повышения энергоэффективности систем связи и вторичного использования каналов.

В исследованных источниках задача повышения энергетической эффективности решается оптимизацией структуры кадра OFDM, регулированием мощно-

сти передачи мобильного устройства с использованием канала управления в соответствии с получаемыми от базовой станции сигналами. Такой подход не решает вопроса снижения максимальной мощности передатчика мобильной станции и позволяет только снижать её мощность при возможности сохранения требуемого качества обслуживания. Существует также метод поворота сигнального созвездия, однако его использование требует глубокого изменения схемы формирования сигналов. Описана идея использования дифференциального метода формирования сигналов OFDM-систем для снижения динамического диапазона их полосового сигнала. Суть метода представлена на рисунке 1 и заключается в следующем. Тракт формирования сигнала OFDM дополнен координированным экстраполятором, синтезирующим сигнал на основе известных спектральных характеристик сигналов синфазной и квадратурной составляющей комплексной огибающей сигнала OFDM и помехи. Исходные значения этих сигналов сравниваются с экстраполированными, и в качестве модулирующего сигнала используется результат их сравнения (разность).

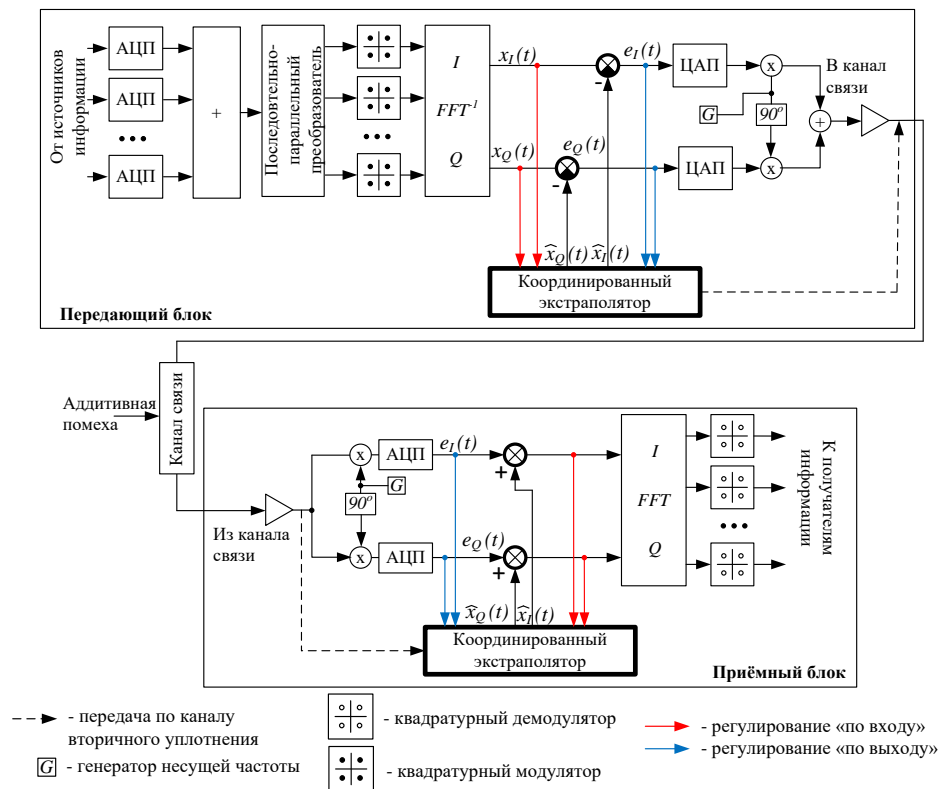


Рисунок 1 – Обобщённая структура тракта OFDM при использовании дифференциальной схемы преобразования сигнала

При приёме после демодуляции полученный сигнал восстанавливается за счёт сложения с сигналом, синтезированным экстраполятором. При этом параметры экстраполятора на приёмной стороне оказываются известными благодаря использованию канала вторичного уплотнения.

В первой главе были сформулированы задачи исследования.

Во второй главе предлагаются схемные решения поставленных задач. Рассмотрена структурная схема тракта формирования OFDM-сигнала с экстраполяцией «по входу» (рисунок 2).

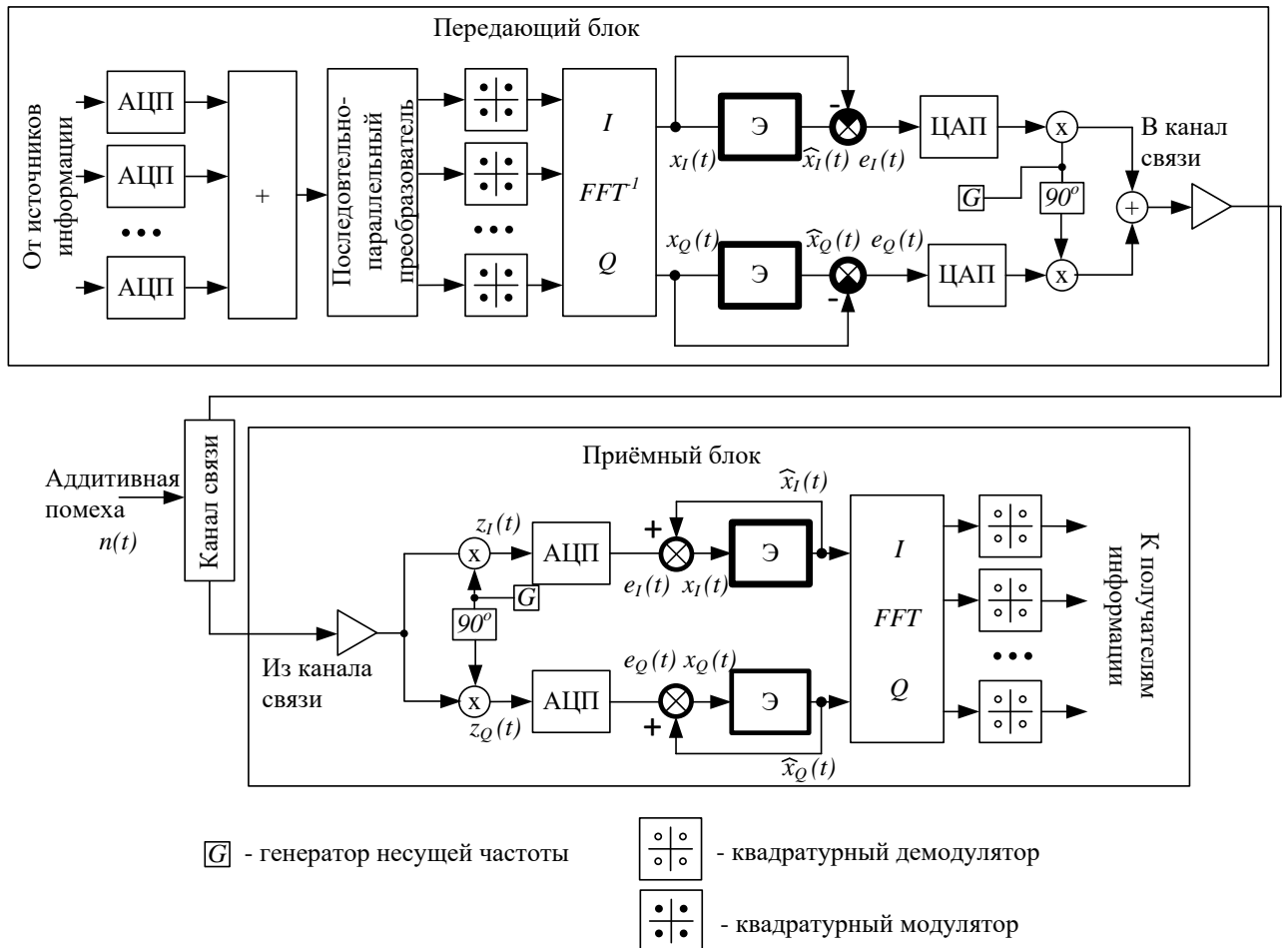


Рисунок 2 – Структурная схема тракта формирования OFDM-сигнала с экстраполяцией «по входу»

Задача синтеза экстраполятора в этом случае может быть сформулирована следующим образом. При известных состояниях входных процессов $x_I(t)$ и $x_Q(t)$ (соответствующих сигналам синфазного и квадратурного каналов системы OFDM) и известном виде помехи в канале связи $n(t)$ найти оценки состояний сигналов синфазного и квадратурного каналов $x_I(t)$, $x_Q(t)$, обеспечивающие минимум динамического диапазона разностного сигнала, то есть:

$$k_I(t) = M[e_I^2(t)] = M\left[\left(x_I(t) - \hat{x}_I(t)\right)^2\right] \rightarrow \min;$$

$$k_Q(t) = M[e_Q^2(t)] = M\left[\left(x_Q(t) - \hat{x}_Q(t)\right)^2\right] \rightarrow \min,$$

где $e_I(t) = x_I(t) - \hat{x}_I(t)$, $e_Q(t) = x_Q(t) - \hat{x}_Q(t)$, при условии сохранения ортогональности разностных сигналов:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T M(e_I(\tau) \cdot e_Q(t - \tau)) d\tau = 0.$$

Показано, что требованиям, предъявляемым к экстраполятору, соответствует решение на основе фильтра Калмана – Бьюси. Его схема для синфазного канала (канала I) приведена в диссертации.

Представленная схема характерна тем, что непосредственно в фильтре учитывается весь процесс передачи и приёма сигнала. Генератор (Γ) и перемножители выполняют роль высокочастотных модулятора и демодулятора. Сигнал $n(t)$ – действующая в канале передачи помеха (белый Гауссовский шум) со спектральной плотностью мощности (СПМ) N_0 . СПМ помехи в свою очередь, определяет передаточную функцию приёмного предусилителя ($K(N_0)$). Охваченный отрицательной обратной связью интегратор реализует уравнение фильтра Калмана. Задача синтеза экстраполятора решена для случая, когда СПМ сигналов синфазного и квадратурного каналов представима в виде:

$$G_I(\omega) = \frac{2 \cdot \alpha \cdot P_I}{\alpha^2 + \omega^2}, \quad G_Q(\omega) = \frac{2 \cdot \alpha \cdot P_Q}{\alpha^2 + \omega^2},$$

где P_I, P_Q – мощность сигнала соответствующего канала;

α – параметр фильтра Калмана, определяющий крутизну СПМ;

ω – угловая частота.

Уравнения фильтра Калмана для синфазного канала в этом случае примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_I(t)}{\partial t} &= -\alpha \cdot x_I(t) + \frac{2 \cdot k_I(t)}{N_0} \cos(\omega \cdot t) \left[z_I(t) - \cos(\omega \cdot t) \cdot x_I(t) \right], \\ \frac{\partial k_I(t)}{\partial t} &= \frac{N_{II}}{2} - 2 \cdot \alpha \cdot k_I(t) - \frac{2}{N_0} \cos^2(\omega \cdot t) \cdot k_I^2(t), \end{aligned}$$

где $z_I(t) = x_I(t) \cos(\omega \cdot t) + n(t)$ – модулированный высокочастотный сигнал синфазной компоненты OFDM, подвергшийся воздействию канальной помехи;

$\cos(\omega \cdot t)$ – несущее колебание с угловой частотой ω ;

N_{II} – параметр фильтра Калмана, определяемый по формуле:

$$N_{II} = \frac{4 \cdot P_I}{\alpha}.$$

Аналогичные выражения можно записать для квадратурного канала.

При описанной постановке для случая синхронной работы системы получены упрощённые выражения для функций $k_I(t)$ и $k_Q(t)$:

$$k_I = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - N_{II} / N_0}}{2 / N_0}; \quad k_Q = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - N_{IQ} / N_0}}{2 / N_0}.$$

Эффективность сжатия для синфазного и квадратурного каналов описывается выражениями:

$$G_I = 20 \cdot \lg \frac{\alpha}{\alpha + \frac{2 \cdot k_I}{N_0}}; \quad G_Q = 20 \cdot \lg \frac{\alpha}{\alpha + \frac{2 \cdot k_Q}{N_0}}.$$

При этом условие устойчивости для экстраполятора, охваченного положительной обратной связью, определяется соотношением:

$$k_I < \frac{\alpha N_0}{2}; \quad k_Q < \frac{\alpha N_0}{2}.$$

Рассмотренная схема имеет ряд преимуществ: позволяет учесть в модели канальную помеху, обеспечивает возможность работы с нестационарными сигналами и обеспечивает возможность решения задачи в цифровой форме. Однако для решений на основе фильтра Калмана характерна большая ошибка экстраполяции на начальных этапах наблюдения сигнала. Также рассмотренная схема требует проверки на устойчивость каждого решения, полученного при изменении любого исходного параметра.

Для устранения положительной обратной связи при восстановлении сигнала предложена схема с экстраполяцией «по выходу» (рисунок 3).

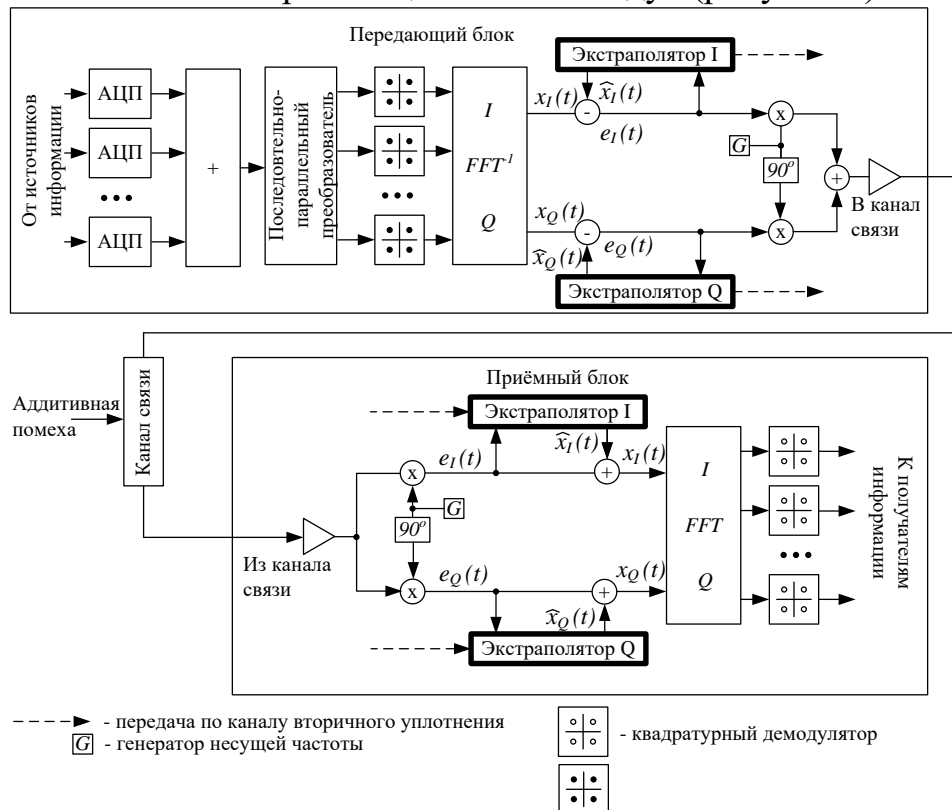


Рисунок 3 – Структурная схема тракта формирования OFDM-сигнала с экстраполяцией «по выходу»

Для представленной структуры требованиям, предъявляемым к экстраполятору, удовлетворяет решение на основе фильтра Винера. Структурная схема тракта формирования и обработки OFDM-сигналов для этого случая приведена в работе. Математическая модель поиска передаточной функции экстраполятора $H(s)$ приведена на рисунке 4. Передаточная функция экстраполятора $H(s)$ в этом случае определяется как ($W(s)$ – желаемая передаточная функция канала):

$$H(s) = \frac{W(s)}{1 - W(s)}.$$

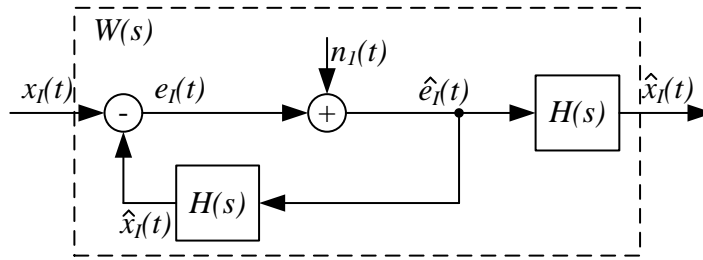


Рисунок 4 – Математическая модель поиска передаточной функции экстраполятора на основе фильтра Винера

В соответствии с задачей оптимальной фильтрации, необходимо уменьшать динамический диапазон сигнала $e(t)$ в квадратурном и синфазном каналах, тогда передаточная функция $W(s)$ находится путём решения уравнения Винера – Хопфа:

$$W(s) = \frac{1}{\Phi_{zz}^+(s)} \left[\frac{\Phi_{zx}(s)}{\Phi_{zz}^-(s)} \right]_+$$

где $x(t)$ – желаемый сигнал на выходе системы имеющий изображение по Лапласу $X(s)$;

$\Phi(s)$ – спектральная плотность мощности (СПМ) соответствующего сигнала;

$z(t)$ – сигнал, смешанный с помехой, $z(t) = x(t) + n_1(t)$.

Для случая аддитивной помехи при условии отсутствия корреляции сигнала и помехи:

$$\Phi_{zz}(s) = \Phi_{xx}(s) + \Phi_{nn}(s); \quad \Phi_{zx}(s) = \Phi_{xx}(s).$$

Следовательно, показана возможность синтеза передаточной функции экстраполятора для синфазного канала. Аналогичным образом может быть получена и передаточная функция экстраполятора квадратурного канала.

Предложенное решение позволяет получить оптимальное решение в классе устойчивых функций, однако его недостатком является наличие экстраполятора в каждом из каналов – это увеличивает вычислительные затраты и противоречит концепции повышения энергоэффективности. Поэтому целесообразным выглядит использование единого координированного экстраполятора для синфазного и квадратурного каналов (рисунок 5).

Математическая модель синтеза экстраполятора (рисунок 6) может быть построена из соображения линейности операции предсказания. В этом случае (с целью упрощения технической реализации) операцию координирования можно представить в виде суммирования. На входе координатора действует аддитивная помеха $n_w(t)$, спектральная плотность мощности (СПМ) Φ_{NN} которой считается известной, которая может быть определена пересчётом канальной помехи. Передаточные функции $W_I(s)$ и $W_Q(s)$ описывают процессы преобразования и задержки в синфазном и квадратурном каналах и также являются известными.

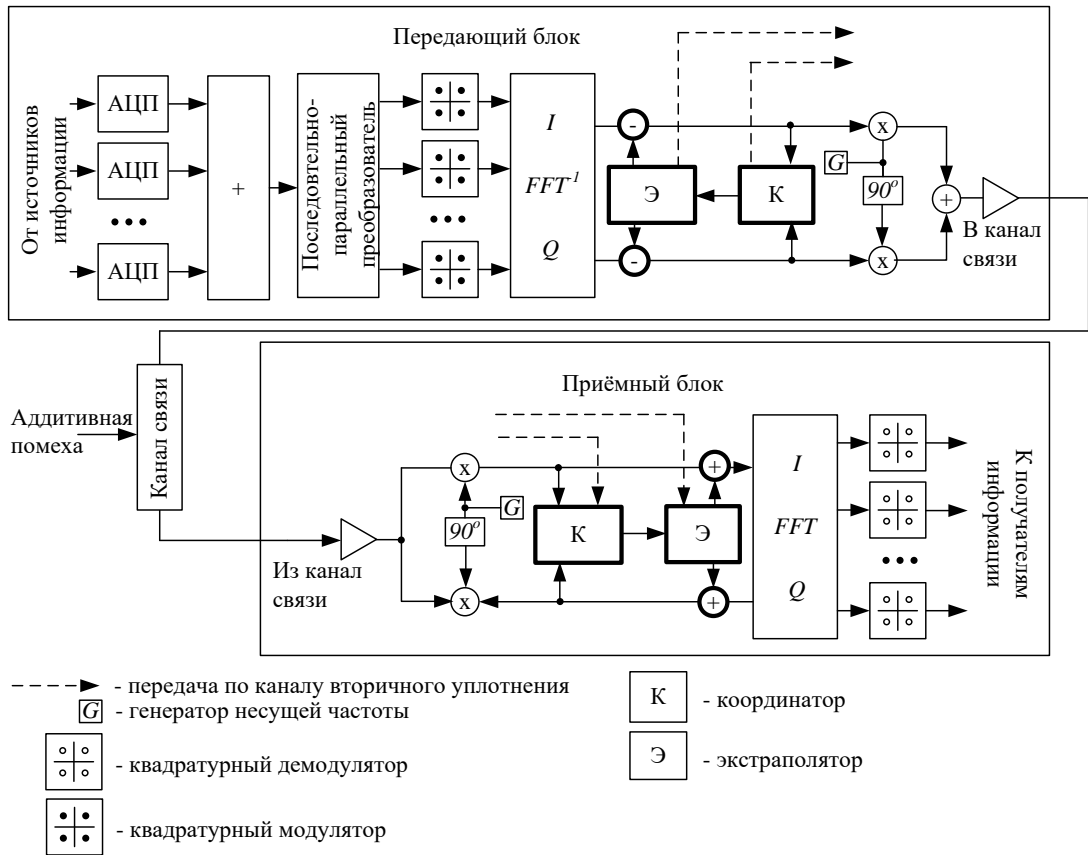


Рисунок 5 – Структурная схема системы передачи сигналов OFDM с координированной экстраполяцией на основе фильтра Винера

Необходимо синтезировать передаточную функцию $W(s)$ предсказателя из условия минимума дисперсии разностных сигналов $e_I(t)$ и $e_Q(t)$, обеспечивая при этом их ортогональность (квазиортогональность), которая достигается выбором коэффициентов K_I и K_Q масштабирующих усилителей. Математическая постановка задачи сформулирована следующим образом. При известных СПМ сигналов синфазного ($\Phi_{II}(s)$) и квадратурного ($\Phi_{QQ}(s)$) каналов, помехи $\Phi_{NM}(s)$ и передаточных функциях $W_I(s)$ и $W_Q(s)$, где s – комплексная переменная Лапласа, определить передаточную функцию $W(s)$ предсказателя в классе устойчивых из условия минимизации функционала $J(W(s))$ вида:

$$J(W(s)) = \sigma_{II}^2(s) + \sigma_{QQ}^2(s) + \lambda_1 \sigma_{IQ}^2(s) + \lambda_2 \sigma_{QI}^2(s), \quad (1)$$

где $\sigma_{II}^2(s)$, $\sigma_{QQ}^2(s)$ – дисперсии соответственно синфазного и квадратурного каналов; $\sigma_{IQ}^2(s)$, $\sigma_{QI}^2(s)$ – коэффициенты взаимной корреляции сигналов синфазного и квадратурного каналов; λ_1 и λ_2 – множители Лагранжа.

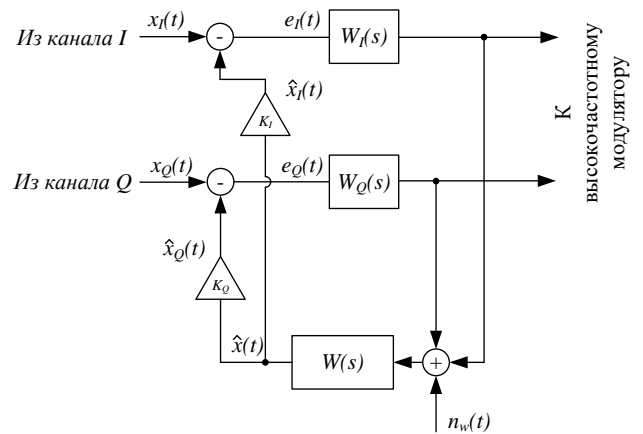


Рисунок 6 – Математическая модель тракта формирования сигнала OFDM

Наличие слагаемых $\lambda_1 \sigma_{IQ}^2(s)$ и $\lambda_2 \sigma_{OI}^2(s)$ в (1) учитывает необходимость удовлетворения условиям ортогональности (квазиортогональности) сигналов, описываемым соотношениями:

$$\sigma_{IQ}^2(s) = \delta_1^2, \quad \sigma_{OI}^2(s) = \delta_2^2, \quad (2)$$

где δ_1 и δ_2 – величины, стремящиеся к нулю в случае ортогональности, и принимающие малые (но не нулевые) значения, определяемые из инженерных соображений, в случае квазиортогональности.

В работе приведено решение поставленной задачи вариационным методом, получено решение вида:

$$W(s, \lambda_1, \lambda_2) = \frac{A(s, \lambda_1, \lambda_2)}{1 - (A(\lambda_1, \lambda_2, s)K_I W_I(s) + A(\lambda_1, \lambda_2, s)K_Q W_Q(s))},$$

где $A(\bullet)$ – функция, зависящая от передаточных функций $W_I(s)$, $W_Q(s)$, коэффициентов K_I и K_Q и спектральных плотностей мощности сигналов квадратурных каналов и помехи, определённая в работе из решения расширенного уравнения Винера – Хопфа.

При этом множители Лагранжа λ_1 и λ_2 определяются после подстановки полученной передаточной функции в выражения для изображений разностных сигналов и решением системы (2) относительно λ_1, λ_2 .

В работе приведён численный пример, показывающий возможность применения описанного метода в том числе для случая трансцендентных функций и демонстрирующий возможность снижения динамического диапазона полосового сигнала описанным методом.

В третьей главе приведено описание системы вторичного уплотнения радиосигналов. Графическое изображение её математической модели приведено на рисунке 7. Задача формирования вторичного канала связи состоит в определении желаемой характеристики СПМ $\Phi_{yy}(j\omega)$ его сигнала, при которой обеспечивалось бы его ограниченное воздействие на основной и вторичный сигнал оставался бы малозаметным на фоне основного сигнала.

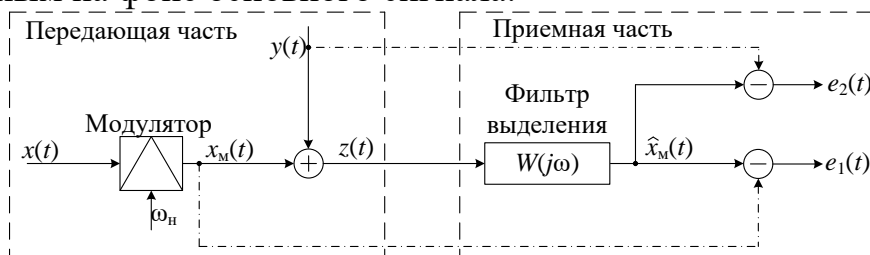


Рисунок 7 – Графическое изображение математической модели системы вторичного уплотнения радиосигналов

Математически задачу синтеза вторичного радиоканала связи можно сформулировать следующим образом: найти функцию СПМ сигнала вторичного канала $y(t)$ и передаточную функцию фильтра выделения $W(j\omega^*)$ с учетом известной функции СПМ сигнала основного канала $x_m(t)$ и минимума взаимного влияния сигналов друг на друга. Математически это требования выражаются функционалами J_1 и J_2 :

$$J_1 = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} M \left\{ \frac{E_1(j\omega) \cdot E_1(-j\omega)}{T} \right\} dj\omega = c^2,$$

$$J_2 = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} M \left\{ \frac{E_2(j\omega) \cdot E_2(-j\omega)}{T} \right\} dj\omega \rightarrow \min,$$

где $E_1(j\omega)$, $E_2(j\omega)$ – образы сигналов ошибки определения сигнала основного и вторичного каналов соответственно.

Задача решается минимизацией функционал J вида:

$$J = J_1 + \alpha J_2 = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} [E_1(j\omega) \cdot E_1(-j\omega) + \alpha \cdot (E_2(j\omega) \cdot E_2(-j\omega))] dj\omega,$$

где α – множитель Лагранжа, определяемый из инженерных условий.

На основании решения уравнения Винера – Хопфа получено решение поставленной задачи:

$$\Phi_Y^+(j\omega^*) = \frac{-1}{\left[(1+\alpha)W(j\omega^*)W(-j\omega^*) - \alpha(W(-j\omega^*) + W(j\omega^*) - 1) \right]^+} \times$$

$$\times \left[\frac{\Phi_{MX}^+(j\omega^*) \left((\alpha+1)W(j\omega^*)W(-j\omega^*) - \alpha W(j\omega^*) - W(-j\omega^*) \right)}{\left[(1+\alpha)W(j\omega^*)W(-j\omega^*) - \alpha(W(-j\omega^*) + W(j\omega^*) - 1) \right]^+} \right],$$

$$\Phi_{YY}(j\omega^*) = \Phi_Y^+(j\omega^*)\Phi_Y^-(-j\omega^*), \quad \Phi_Y^-(-j\omega^*) = \Phi_Y^+(-j\omega^*)$$

$$W(j\omega^*) = \frac{1}{\left[(1+\alpha) \left(\Phi_{MX}(j\omega^*) + \Phi_{MX}^-(-j\omega^*)\Phi_Y^+(j\omega^*) + \Phi_{MX}^+(j\omega^*)\Phi_Y^-(-j\omega^*) + \Phi_{YY}(j\omega^*) \right) \right]^+} \times$$

$$\times \left[\frac{\left(\Phi_{MX}(j\omega^*) + \Phi_{MX}^+(j\omega^*)\Phi_Y^-(-j\omega^*) + \alpha \left(\Phi_{MX}^-(-j\omega^*)\Phi_Y^+(j\omega^*) + \Phi_{YY}(j\omega^*) \right) \right)}{\left[(1+\alpha) \left(\Phi_{MX}(j\omega^*) + \Phi_{MX}^-(-j\omega^*)\Phi_Y^+(j\omega^*) + \Phi_{MX}^+(j\omega^*)\Phi_Y^-(-j\omega^*) + \Phi_{YY}(j\omega^*) \right) \right]^+} \right],$$

где обозначение $[\bullet]_+$ указывает на то, что полюсы выражения, заключенного под этим знаком лежат в левой полуплоскости комплексной плоскости, $[\bullet]_-$ – соответственно, в правой.

Таким образом, для получения решения задачи необходимо проведение факторизации и сепарации, что затруднительно на практике. Поэтому был предложен алгоритм определения параметров системы вторичного уплотнения $(\Phi_Y^+(j\omega), W(j\omega))$, позволяющий упростить их нахождение. Решение получено на основе частотного метода. Полученный алгоритм синтеза параметров вторичного канала приведен в работе.

В четвёртой главе было проведено имитационное моделирование предлагаемой системы для использования в высокочастотном тракте системы передачи информации комплекса дистанционного зондирования Земли. приняты следующие параметры системы передачи. Ширина полосы канала 8 МГц, количество поднесущих OFDM – 16, модуляция на поднесущих – QPSK. Канал моделируется как среда с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ), мощность которого обуславливает отношение сигнал-шум на приёме на уровне 22 дБ. При этом не

учитывается многолучевое распространение и замирания в канале связи. Указанные исходные данные и допущения применимы при использовании предложенного метода для канала связи с микроспутником дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (канал «спутник – микро-спутник») или для канала связи малогабаритного беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с наземной станцией управления. В качестве квадратурной модуляции используется QPSK. В качестве сообщения используется снимок системы ДЗЗ размером 512x512 пикселей в формате BMP без сжатия, цветовая схема – оттенки серого. Пример обрабатываемого изображения представлен на рисунке 8.

Графический файл, в соответствии с разработанной методикой, разбивается на фрагменты 32x32 пикселя, затем каждый из полученных 256 фрагментов используется для формирования символов QPSK, которые подвергаются обратному быстрому преобразованию Фурье, что позволяет получить первый тип полосового сигнала – сигнал системы передачи OFDM без использования дифференциального преобразования (сигнал 1).

Далее полученный сигнал подвергается свёртке с импульсной характеристикой экстраполятора, вычисляется разность между сигналом 1 и его экстраполированным значением, таким образом, формируется второй тип полосового сигнала – сигнал, сжатый по дифференциальной схеме (сигнал 2). Далее формируется третий вариант полосового сигнала (сигнал 3) – мощность сигнала 1 понижается до соответствующего значения мощности сигнала 2. Затем имитируется передача сформированных полосовых сигналов по каналу с АБГШ. Принятый полосовой сигнал проходит процедуру прямого преобразования Фурье. Поскольку ранее было получено 3 варианта полосового сигнала, появляется возможность сравнить сигнальные созвездия QPSK, полученные обработкой разных полосовых сигналов, и оценить коэффициент символьной ошибки.



Рисунок 8 – Обрабатываемое изображение

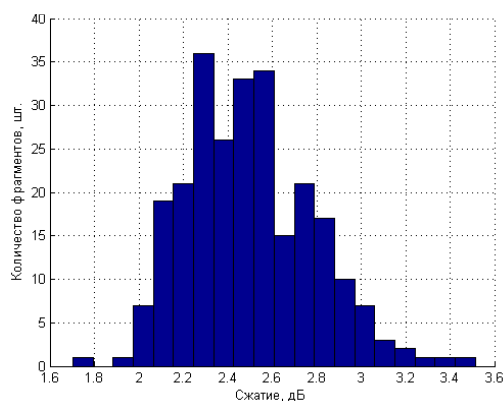


Рисунок 9 – Гистограмма коэффициентов сжатия

что коэффициент символьной ошибки для приёма сигналов 1 и 2 практически совпадают, а коэффициент символьной ошибки сигнала 3 превышает их на 2 по-

В результате моделирования было получено 256 значений выигрыша по мощности при использовании дифференциального преобразования. На рисунке 9 приведена гистограмма полученных значений. По горизонтальной оси отложены коэффициенты сжатия, дБ, по вертикальной – количество информационных посылок. Приведённая гистограмма показывает, что применяемый метод обеспечивает сжатие от 1,6 дБ до 3,5 дБ, среднее сжатие составляет 2,49 дБ. В работе показано,

рядка. На рисунке 10 приведены сигнальные созвездия принятых квадратурных сигналов, полученных для случая передачи одного из фрагментов (слева направо – результаты для сигналов 1, 2 и 3).

В работе проанализированы причины того, что коэффициент сжатия варьируется для различных фрагментов изображения. Показано, что коэффициент сжатия оказывается вы сок при высокой взаимной корреляции соседних элементов изображения. Для уменьшения корреляции применено перемежение, показано, что при этом применение дифференциального преобразования по-прежнему уменьшает динамический диапазон полосового сигнала.

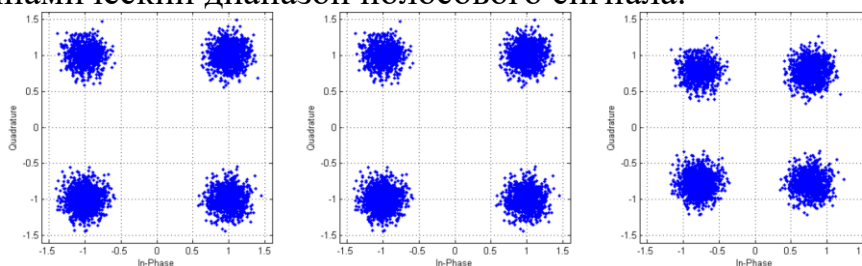


Рисунок 10 – Пример созвездий принятых сигналов

Проведен предварительный анализ интегральной эффективности системы передачи данных микроспутника УГАТУ-САТ при использовании дифференциального преобразования сигнала OFDM. Вычисления базируются на основе теории нечетких множеств с учётом экспертных оценок. Для оценки были введены несколько основных критериев эффективности системы: скорость передачи данных, помехозащищённость, требуемые вычислительные затраты, относительная энергетическая эффективность, а также несколько дополнительных. Определена важность каждого критерия. Интегральная эффективность рассчитывалась как сумма произведений значимости критерия на значение критерия относительно прототипа. Получены следующие показатели увеличения интегральной эффективности относительно прототипа – микроспутника «УГАТУ-САТ» в зависимости от способа экстраполяции сигналов: от 10 до 34 % при использовании экстраполятора на основе фильтра Калмана, от 10 до 40% – при использовании экстраполятора на основе фильтра Винера, от 5 до 22% – при использовании экстраполятора на основе фильтра Винера с координированием.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны структурные решения для построения кодеков OFDM-сигналов, основанных на дифференциальном преобразовании сигналов, отличающиеся координированной поканальной экстраполяцией сигналов «по входу» (на основе фильтрации Калмана – Бьюси) и «по выходу» (на основе фильтрации Винера), позволяющее добиться снижения динамического диапазона полосового сигнала.

2. Разработана математическая модель экстраполяции сигнала OFDM на основе фильтра Калмана – Бьюси и элементов сравнения с квадратурными составляющими исходного сигнала, позволяющая снизить динамический диапазон передаваемого сигнала; сформулировано условие устойчивости передаточной функции схемы восстановления исходного сигнала.

3. Разработана математическая модель экстраполятора сигнала OFDM, основанная на применении фильтра Винера, отличающаяся совместным рассмотрением спектральных характеристик квадратурных каналов и позволяющая использовать единый экстраполятор для квадратурных составляющих исходного сигнала.

4. Разработана модификация метода вторичного уплотнения для систем с OFDM, отличающаяся уплотнением модулированных сигналов, основанная на минимизации взаимного влияния основного и вторичного каналов и позволяющая рассчитывать спектральные характеристики сигнала вторичного канала частотным методом и, на уровне системы связи, передавать параметры экстраполятора приёмному блоку вне зависимости от способа организации основного канала.

5. Разработана методика оценки параметров качества предложенных моделей и имитационная модель дифференциального OFDM-кодека для системы передачи информации спутникового комплекса дистанционного зондирования Земли, основанного на спектральных характеристиках сигнала и помехи и позволяющего снизить уровень средней мощности передатчика на величину 1,8 – 3,5 дБ. Показано, что величина, на которую может быть уменьшена мощность передатчика, зависит от избыточности исходного сообщения.

6. Произведена оценка интегральной эффективности системы передачи информации по комплексу показателей (энергоэффективности, скорости передачи, помехоустойчивости, вычислительной сложности). В зависимости от способа экстраполяции сигналов, повышение энергоэффективности относительно прототипа – микроспутника «УГАТУ-САТ» составляет: от 10 до 34 % при использовании экстраполятора на основе фильтра Калмана, от 10 до 40% – при использовании экстраполятора на основе фильтра Винера, от 5 до 22% – при использовании экстраполятора на основе фильтра Винера с координированием.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В рамках дальнейших исследований планируется проверка возможности использования для экстраполяции сигналов теории нелинейной фильтрации. Предполагается возможность использования дифференциального преобразования для оптических сигналов, а также в многоканальных системах.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Воронков, Г.С. Подход к концепции построения низкоскоростных OFDM-модемов для энергодефицитных систем связи / Г.С. Воронков, И.В. Кузнецов // Электротехнические и информационные комплексы и системы – Уфа, 2016. – С. 44-49

2. Воронков, Г.С. Разработка дифференциального OFDM-преобразователя с координированным предсказанием сигналов для энергодефицитных систем связи / И.В. Кузнецов, Г.С. Воронков, А.Х. Султанов, В.В. Антонов. // Радиотехника – М.: Радиотехника. – 2016. – №12. – С. 59-63.

3. Воронков, Г.С. Повышение энергоэффективности систем радиосвязи с ортогональным частотным мультиплексированием сигналов на основе их экстраполяции по Калману / Г.С. Воронков, И.В. Кузнецов, А.Х. Султанов // Инфокоммуникационные технологии – Самара: ПГУТИ. – 2017. – Т.17. – №3. – С. 33-40.

В других изданиях

1. Воронков, Г.С. Экономный модем OFDM для энергодефицитных систем связи / И.В. Кузнецов, Г.С. Воронков // Труды XVI МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Уфа, УГАТУ. – 2015, – с. 121-123.

2. Кузнецов, И.В. Повышение эффективности энергодефицитных автономных систем радиосвязи на основе метода дифференциального преобразования OFDM-сигналов / И.В. Кузнецов, Г.С. Воронков // Труды XVII МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Самара, ПГУТИ. – 2016. – с. 74-75.

3. Кузнецов, И.В. Синтез передаточной функции координированного предсказателя для дифференциального преобразователя OFDM-сигналов / И.В. Кузнецов, Г.С. Воронков // Труды XVII МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Самара, ПГУТИ. – 2016. – с. 76-77.

4. Воронков, Г.С. Структурные схемы дифференциального преобразования сигналов в системах с ортогональным частотным мультиплексированием / Г.С. Воронков // Труды МНТК «Перспективные информационные технологии». – Самара. – 2017. – с. 62-64.

5. Воронков, Г.С. Возможность вторичного уплотнения в системах с ортогональным частотным мультиплексированием / Г.С. Воронков // Труды МНТК «Перспективные информационные технологии». – Самара. – 2017. – с. 65-66.

6. Воронков, Г.С. Моделирование дифференциального преобразования сигналов OFDM для передачи изображений / Воронков Г.С. // Труды МНТК «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы - 2017» (ПРЭФЖС-2017). – Казань, КНИТУ-КАИ. – 2017., с. 65-66.

7. Воронков, Г.С. Повышение энергоэффективности систем передачи с OFDM на основе дифференциального преобразования сигналов/ Воронков Г.С., Кузнецов И.В. // Труды III МНТК Информационные технологии и нанотехнологии. – Самара. – 2017. – с. 741-745.

Диссертант

Г.С. Воронков

ВОРОНКОВ Григорий Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОДЕФИЦИТНЫХ
АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ OFDM-СИГНАЛОВ**

Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати ____2017. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл.печ.л. 1,0. Уч.-изд.л. 0,9.
Тираж ____ экз. Заказ № ____

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»
Центр оперативной полиграфии
450008, Уфа-Центр, К.Маркса, 12